

## 2004年10月23日新潟中越地震の余震の震源メカニズム

堀 直人\*・山本 俊六\*\*・谷山 春菜\*\*\*

## Source mechanism of aftershocks by 2004 Mid Niigata earthquake

N. HORI, S. YAMAMOTO and H. TANIYAMA

Using the CMT analysis for aftershocks ( $M_j > 3.0$ ) of 2004 Mid Niigata earthquake ( $M_j$  6.8) carried out by National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED), the spatial variation of fault mechanism around the region are studied and seeking the small earthquakes as empirical Green functions from 2362 number aftershocks ( $M_j > 1.5$ ), the source time functions of target aftershocks are obtained. From these source time functions, the static stress drops and the dynamic stress drops are calculated based on the circular seismic source theory.

## 1. はじめに

2004年10月23日17時56分に新潟県中越地方の深さ13 kmで $M_j$ 6.8（新潟県の川口町で震度7，小千谷市，山古志村，小国町で震度6強，長岡市，十日町市，栃尾市，越路町，三島町，堀之内町，広神村，守門村，入広瀬村，川西町，中里村，刈羽村で震度6弱を観測）の地震が発生した。新潟県中越地方の下部には，日本海側のユーラシアプレートと，陸側の北米プレートの境界があり，主な周辺の活断層群や，十日町断層は北東傾斜の逆断層である。今回の余震分布もこれにそった形で約20度の北東傾斜で発生している。また，震度の大きな川口，小千谷，堀の内，小出は，信濃川の支流の魚野川に沿っており，場所によって厚さ5000 mを越える堆積層が分布している。このため，マグニチュードに比較して，より大きな被害が生じたと考えられる。しかし，この本震は震源が内陸部にあったために，防災科学技術研究所による高感度地震観測網 Hi-Net や広帯域地震観測網 F-Net により，本震の震源を取り囲んで極めて良い余震データが得られた。また，余震回数が多く11月13日までに $M_j$ 1.5以上の2362個の余震が観測された。

本論では，これらの余震の震源メカニズム分布を示す。一方，J. Mori は，1994年のノースリッジ地震 ( $M_w$  6.7) に対して 主な余震による応力降下量と放射エネルギーを求めた。(参考文献 1. Mori, J., 2003)。本論ではこの方法に従って，マグニチュード4.3以上の余震にターゲット地震を選択し，グリーン関数として，ターゲット地震から測地距離が2 km 以内の微小地震を

用い，デコンボリューション手法により14個の震源時間関数 (source time function) を求めた。このうちインパルスの明快な3つの震源時間関数と，それによる静的応力降下ならびに動的応力降下を示す。

## 2. データと方法

## 2.1 新潟中越地方の地震活動

解析には，防災科学技術研究所 F-net (Full Range Seismograph Network of Japan) のモーメントテンソル (CMT) を用いた。F-net は  $M$ 3.5以上の地震に関しては CMT 解を自動および手動で計算している。2001年度から1997年以降発生した震源メカニズムデータを公開している。そこで，本論では，新潟地域の地震データを用いて1998年1月～2004年の11月13日までの $M_j$ 3.0以上の148個のイベントについて，震源メカニズムを Fig. 1 に示した。解析には GMT を用いた。これより，一連の地震メカニズムは北西―南東圧縮の逆断層型であることがわかる。また，同様の期間の， $M_j$ 5 以上の22個のイベントについて，震源メカニズムを Fig. 2 に示した。

## 2.2 新潟中越地震の余震分布

つぎに，今回の本震 (2004/10/23, 17:56) に対して余震がどのような震源特性を持っていたか震源メカニズムから検討する。新潟中越地方を中心に，北緯36.9度から37.6度，東経138.6度から139.4度，深度30 km 以浅の範囲について2003年10月23日から2003年11月13日までの F-net 公開データを調べた結果， $M$ 3.0以上の地震データは121個得ることが出来た。Fig. 3 は，震源メカニズムの分布をプロットしたものである。平面図はメカニズムの南半球を示す。また，北東傾斜の領域に対し A-B 断面に沿った断面図に，緯度方向へメカニズム球

\* 工学部建築デザイン工学科教授

\*\* 地震予知総合研究振興会研究員

\*\*\* 工学部建築デザイン工学科研究生

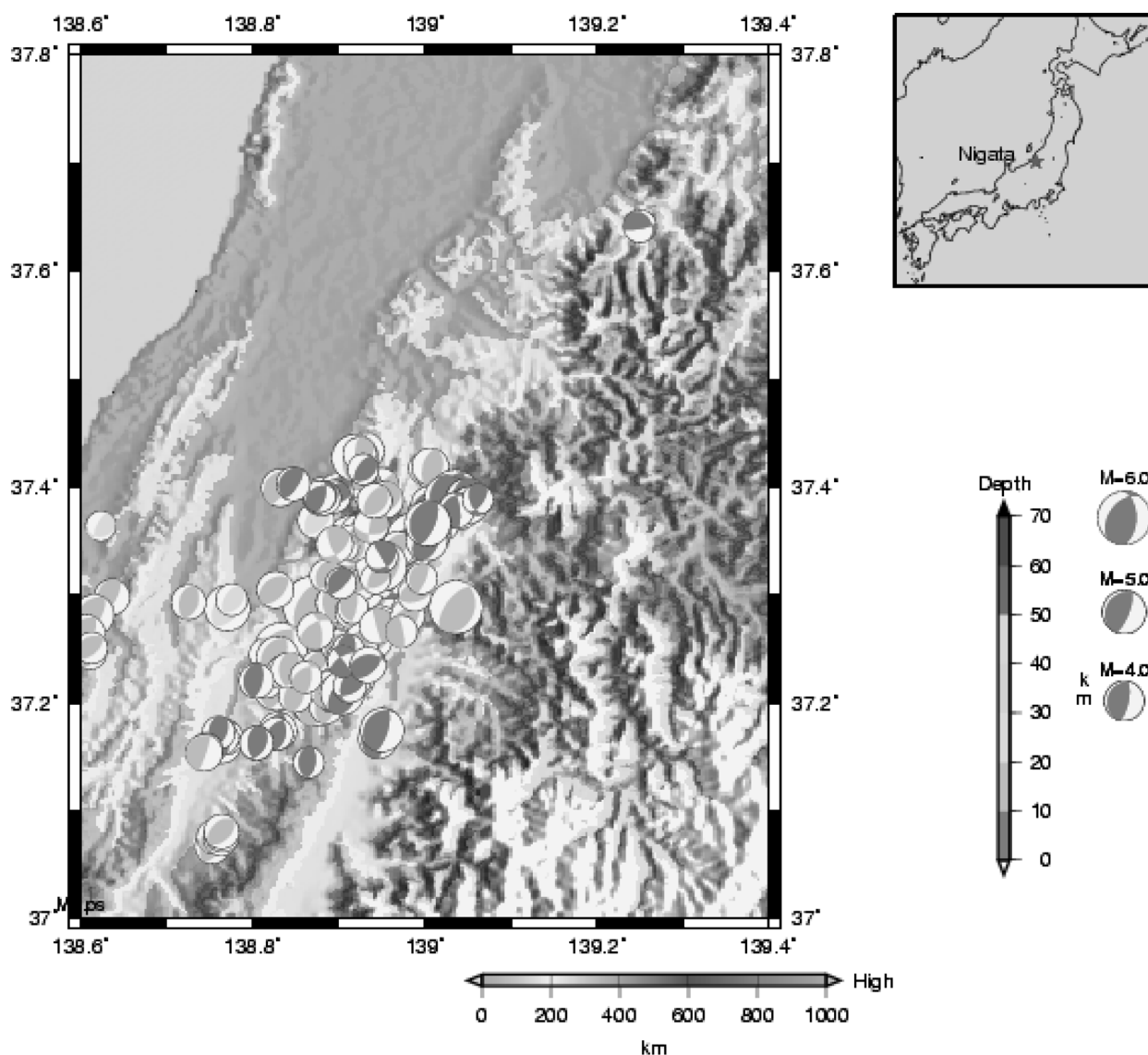


Fig. 1. Distribution of source mechanisms ( $M > 3.0$ ) in Mid Niigata region during Jan. 1998 to 13 Nov. 2004.

を投影した震源メカニズムを示した。同様にB-C断面に沿った断面図に経度方向へメカニズム球を投影した震源メカニズムを示した。メカニズム球内の黒丸は主圧縮軸、白丸は主引張軸を表す。これから余震の震源メカニズムも北西-南東圧縮の逆断層型であること、また、余震は断面内で北東から南西方向にほぼ水平に伸び、深さ約20 kmの範囲に分布していることがわかる。Fig. 3には、Hi-netの観測点を示した。それぞれ、N-NGOH（長岡）、N-KWNH（川西）、N-YNTH（湯之谷）、N-SZWH（塩沢）、N-MUIH（六日町）である。

### 2.3 余震のターゲット地震

次に、震源破壊の特性を求めるために、余震による震源時間関数を求める。方法は、経験的グリーン関数手法を用いた。はじめに、余震の中からターゲット地震を選び、それに対する経験的グリーン関数として、微小地震

（種地震）を選択した。この微小地震によりターゲット地震のデコンボリューションを行い、ターゲット地震の震源時間関数を求めた。ターゲット地震は、次の条件で求めた。(1)期間は本震後の2004年10月23日17:53から2004年11月13日17:53の21日間とした。(2)F-net, Hi-netの両方で記録されたデータとする。(3)マグニチュード  $M_j 4.3$ 以上の余震とする。(4)本震から50 km以内の観測点で観測した余震データとする。(5)観測点は、本震を取り囲む長岡、川西、湯之谷を主とし、補助的に六日町、塩沢を加えた5地点とする。それぞれ本震からの距離は、長岡（N. NGOH）15.07 km、川西（N. KWNH）17.19 km、湯之谷（N. YNTH）12.75 km、六日町（M. MUIH）28.88 km、塩沢（N. SZWH）29.13 kmである。これらの条件で余震の中から32個のイベントをターゲット地震として選択した。なお、 $M_j$

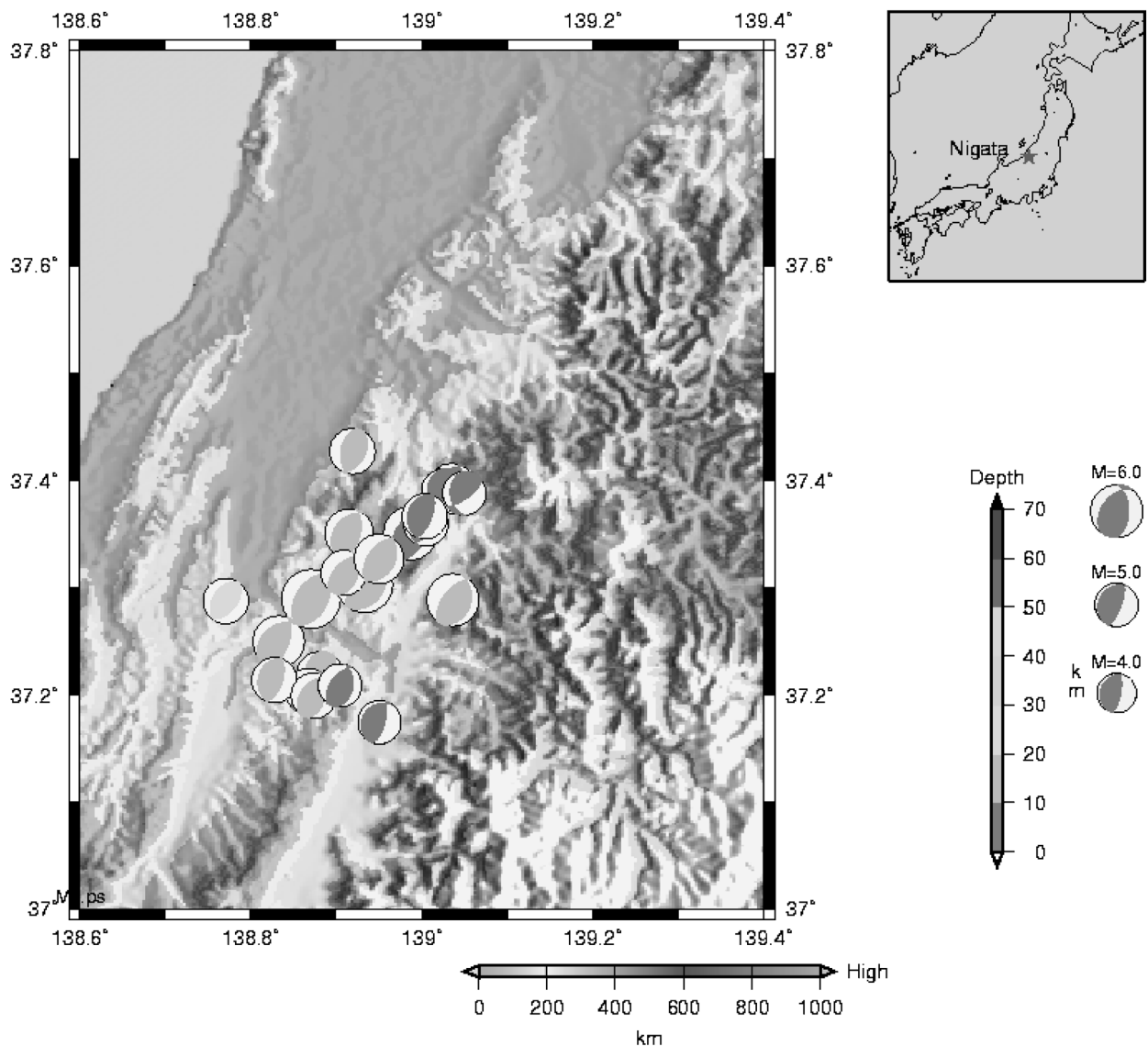


Fig. 2. Distribution of source mechanisms ( $M > 5.0$ ) in Mid Niigata region during Jan. 1998 to 13 Nov. 2004.

4.2以上とすると、47個のイベントとなる。以上の32個のイベントデータを Table 1 に示した。また、震源メカニズムを Fig. 4 に示した。

#### 2.4 経験的グリーン関数

ターゲット地震に対してグリーン関数となる微小地震を選ぶ。ターゲット地震の条件(1)にあう  $M_j 1.5$  以上のイベントを検索し、Hi-net より新潟県中部の地震データをダウンロードして、2362個のデータを取得した。この中から、次の条件に合うものを微小種地震とした。条件は、(1)震源位置がターゲット地震の震源位置から、測地線距離、震源深さ共に 2 km 以内の余震とした。(2)ターゲット地震のマグニチュードを  $_T M_j$  とすると、微小種地震のマグニチュード  $_S M_j$  を、 $1.5 \leq _S M_j < _T M_j / 1.5$  とする。

#### 2.5 波形

32個のターゲット地震と各ターゲットに対する微小地震データの上下動成分について波形の特性を見た。余震が重なり合うもの、P 波立ち上がりの不明確なもの、1つの観測地点に2個以上のイベントがとれないものを除いていった。その結果残った18個のターゲットについて、速度波形の上下動成分の P 波開始より 1 秒前から開始後 2 秒のデータを切り出し、速度波形と、それを積分した変位波形を求めた。その例として、22番のターゲット地震を Fig. 5 に、1627番の微小地震を Fig. 6 に示した。それぞれの図中で上は速度波形を、下は変位波形を示す。

**Table 1** Mid Niigata aftershocks analyzed in this study.

Events	Date	Time (hr : min) (JST)	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Depth (km)	Magnitude (Mw)	Distance From Main Shock (km)
1	2004/10/23	03 : 12.7	37.351	138.987	9.4	5.9	12.4
2	2004/10/23	07 : 31.0	37.345	138.868	14.9	5.3	6.2
3	2004/10/23	34 : 05.7	37.303	138.933	14.2	6.3	5.8
4	2004/10/23	57 : 04.9	37.211	138.842	9.3	5.1	9
5	2004/10/23	36 : 46.0	37.214	138.827	11	5	9.2
6	2004/10/23	46 : 50.2	37.351	138.915	15.3	5.5	7.9
7	2004/10/23	44 : 27.6	37.27	138.946	14.6	4.9	7
8	2004/10/23	34 : 45.7	37.314	138.909	19.9	5	4.4
9	2004/10/24	59 : 29.8	37.166	138.946	5	4.3	15.3
10	2004/10/24	08 : 12.4	37.251	138.918	13.3	4	6
11	2004/10/24	28 : 04.4	37.214	138.896	12.2	4.6	8.7
12	2004/10/24	21 : 35.0	37.242	138.829	11.5	4.7	6.4
13	2004/10/24	06 : 31.9	37.293	138.897	12.4	4.3	2.4
14	2004/10/24	00 : 30.1	37.175	138.95	1.6	4.8	14.5
15	2004/10/25	28 : 08.9	37.2	138.874	10.1	5.1	10
16	2004/10/25	56 : 15.4	37.212	138.889	10.3	4.2	8.8
17	2004/10/25	27 : 52.4	37.162	138.764	6.3	4.4	17
18	2004/10/25	04 : 57.6	37.327	138.95	15.2	5.6	8.2
19	2004/10/27	26 : 21.7	37.348	138.916	14	4	7.7
20	2004/10/27	40 : 50.2	37.289	139.036	11.6	5.8	74
21	2004/11/ 1	35 : 49.1	37.209	138.904	8.5	4.8	9.4
22	2004/11/ 4	57 : 29.5	37.427	138.919	18	5.1	15.9
23	2004/11/ 6	53 : 21.4	37.359	139.005	0.2	4.9	77.1
24	2004/11/ 6	16 : 50.0	37.368	139.007	1.2	4.3	77
25	2004/11/ 6	05 : 11.8	37.347	138.895	12.6	4	6.7
26	2004/11/ 8	15 : 58.5	37.393	139.035	0	5.5	18.6
27	2004/11/ 8	27 : 10.1	37.391	139.025	0	4.8	17.7
28	2004/11/ 8	32 : 17.2	37.388	139.05	5.8	4.8	19.3
29	2004/11/ 8	43 : 05.8	37.38	139.042	2.2	4.3	18.2
30	2004/11/ 9	15 : 59.7	37.351	139.002	0	4.6	13.5
31	2004/11/10	43 : 08.4	37.367	139.004	4.5	5.1	14.6
32	2004/11/12	24 : 00.2	37.235	138.934	9.8	3.9	8.3

### 3. 震源パラメータ

#### 3.1 震源時間関数

さらにターゲットと微小地震のP波立ち上がりをそろえ、デコンボリューションを行った例として1627番の微小地震の変位波形と22番のターゲット地震の変位波形をデコンボリューションして、1627番の微小地震で割

り、以下の式より振幅補正Hを求め震源時間関数として求めた。

$$Mo(Nm) = H \int Amp(t) dt = H[Nm/s] \times \text{面積}(s) \quad (1)$$

ただし  $M_0$  : 地震モーメントである。デコンボリューション結果を Fig. 7 に示す。この図の初期立ち上がり部

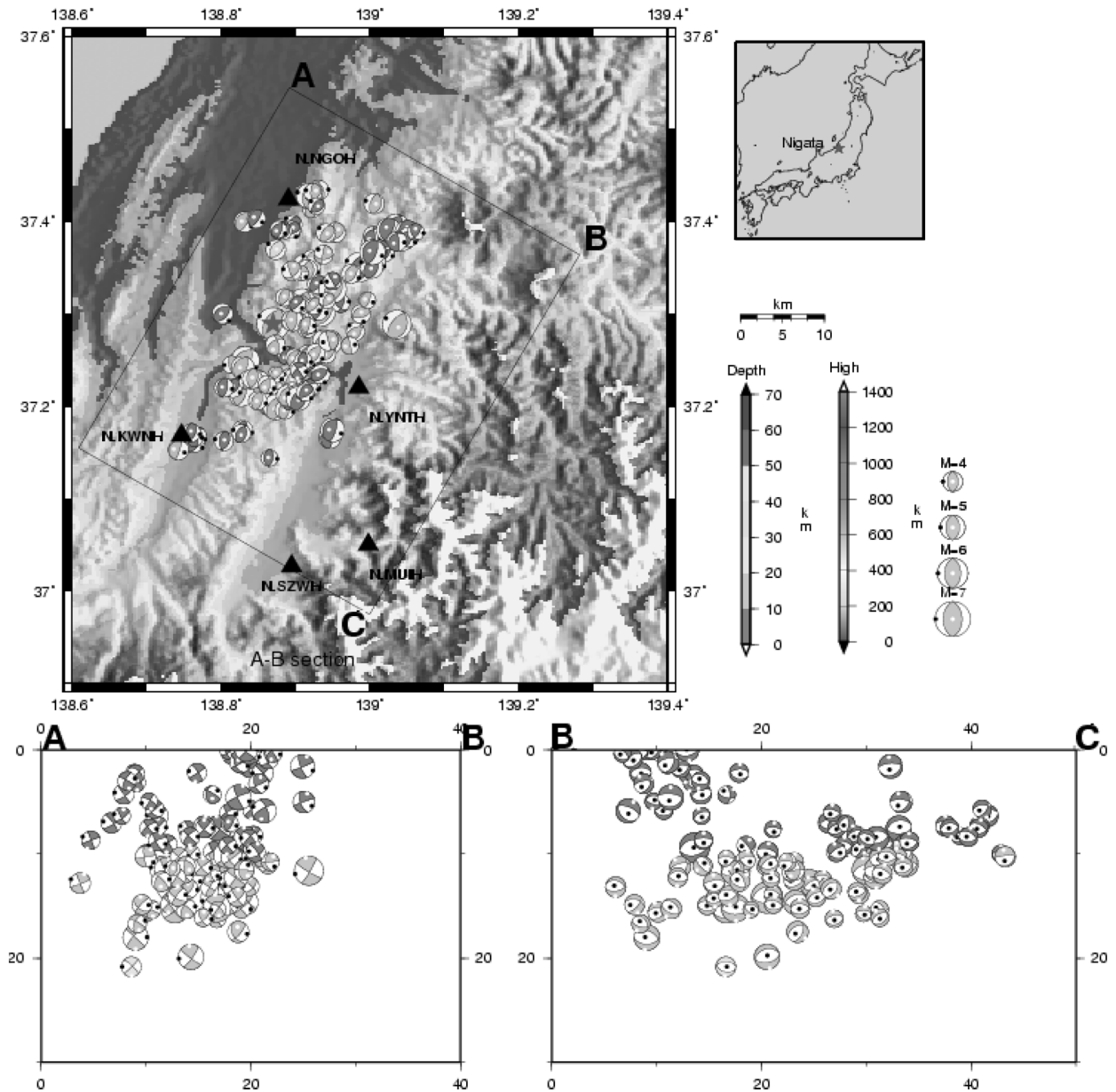


Fig. 3. Distribution of source mechanisms ( $M > 3.0$ ) in Mid Niigata region and its vertical section during 23 Oct. 2004 to 13 Nov. 2004.

分から震源時間関数を求めた (Fig. 8)。この図より、震源時間関数の立上りについて初期勾配と、継続時間を求めた。この図から、震源破壊関数の継続時間は、0.6 s 程度であることが分かる。同様に、14個のターゲットに対して震源時間関数が得られた。他の例についても、デコンボリューション結果とその震源時間関数を示す。Fig. 9, Fig. 10は20番目のターゲット地震に対して、それぞれ1026番目の微小地震と1024番目の微小地震で求めた結果である。これらの震源時間関数は Fig. 11に示した。グリーン関数のとり方によって差が現れている。また、Fig. 12に21番目のターゲット地震に対するデコンボリューション結果を示す。また、その震源時間関数を

Fig. 13に示した。明らかなピークが2つ見られる。

### 3.2 余震による応力降下

静的応力降下：下記の式を使い静的応力降下  $\Delta\sigma_s$  を求めた。

$$\Delta\sigma_s = (7/16)Mo/r^3 \quad (2)$$

ここに、 $r$ ：等価円破壊モデル（参考文献J. Boatwright, 1980）による断層破壊半径、

$$r = \tau_{\frac{1}{2}}^{-1} V / \left( 1 - \frac{V}{\alpha \cdot \sin \theta} \right), \quad \tau_{\frac{1}{2}}^{-1} = \frac{Durs}{2},$$

$Durs$ ：震源時間関数から求めた破壊継続時間、破壊速度： $V = 0.75\beta$ 、 $\beta$ ：S波速度、 $\alpha$ ：P波速度、 $\theta = 0.64$ である。P波速度は東京大学地震研究所により示されてい

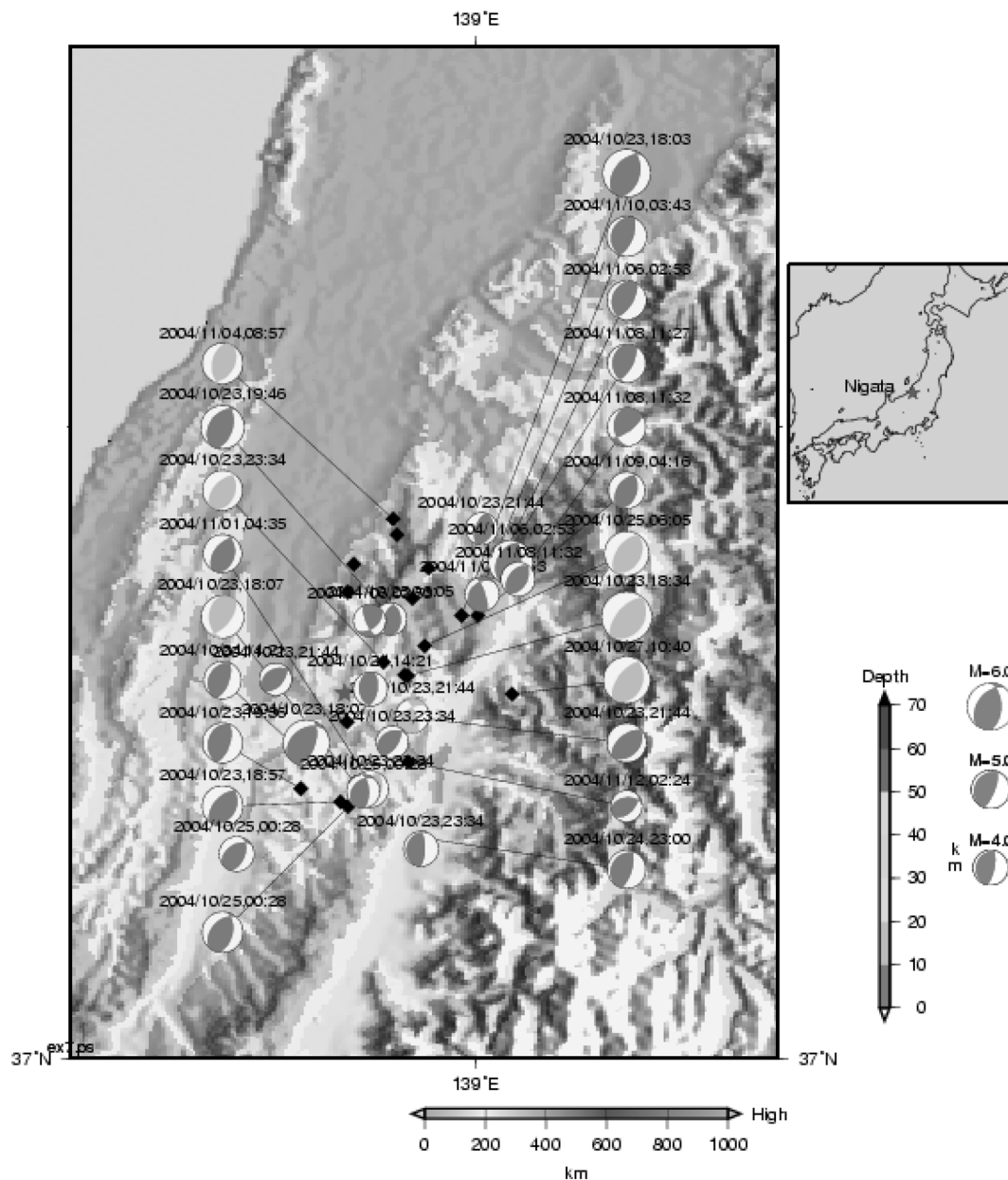


Fig. 4. Distribution of source mechanisms of target aftershocks during 23 Oct. 2004 to 13 Nov. 2004.

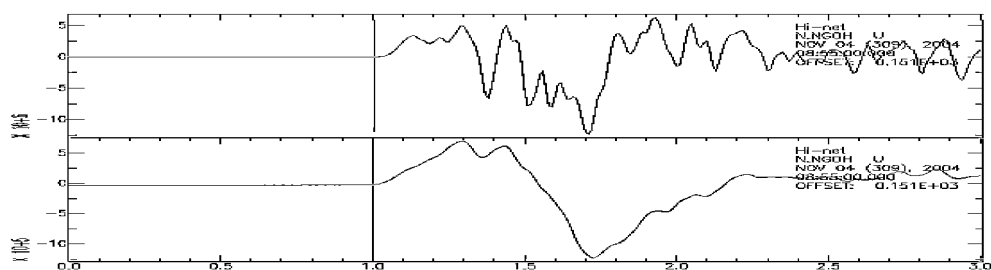


Fig. 5. Vertical component records of target event 22, velocity record (top) at N. NGOH and calculated displacement (bottom).

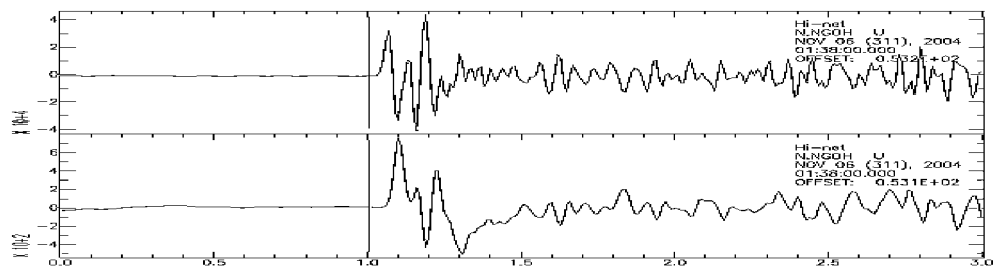


Fig. 6. Vertical component records of small event 1627, velocity record (top) at N.vNGOH and calculated displacement (bottom).

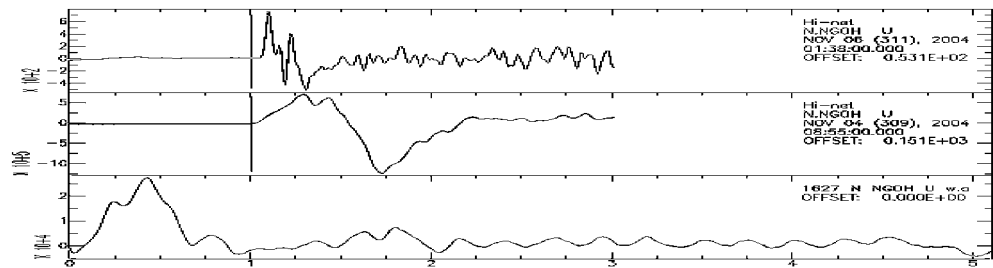


Fig. 7. Displacements of small event 1627 (top), and target event 22 (center) during before 1 sec, and after 2 sec to rise time of P wave, and deconvolution result (bottom).

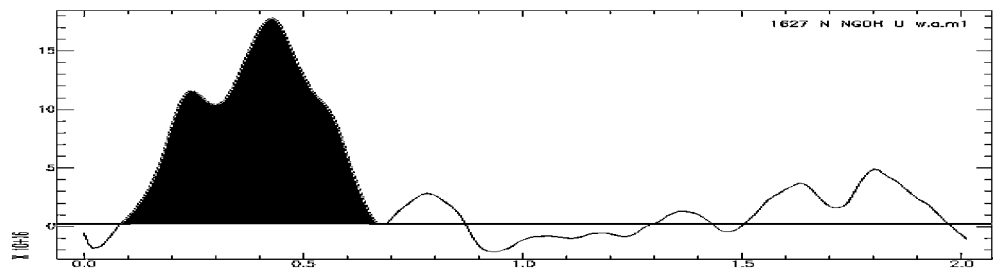


Fig. 8. Source time function of target event 22 and small event 1627.

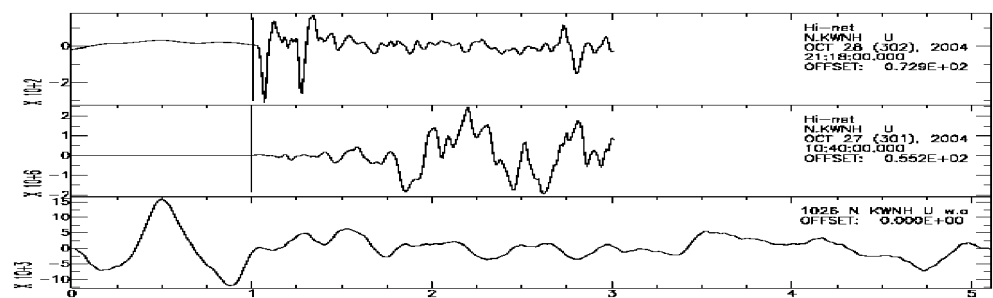


Fig. 9. Displacements of small event 1026 (top), and target event 20 (center) during before 1 sec, and after 2 sec to rise time of P wave, and deconvolution result (bottom).

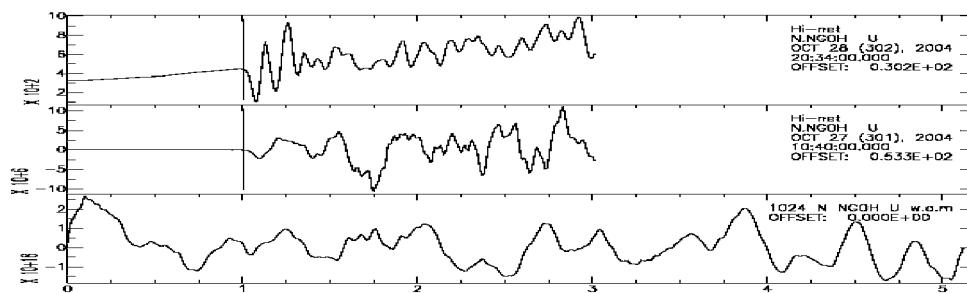


Fig. 10. Displacements of small event 1024 (top), and target event 20 (center) during before 1 sec, and after 2 sec to rise time of P wave, and deconvolution result (bottom).

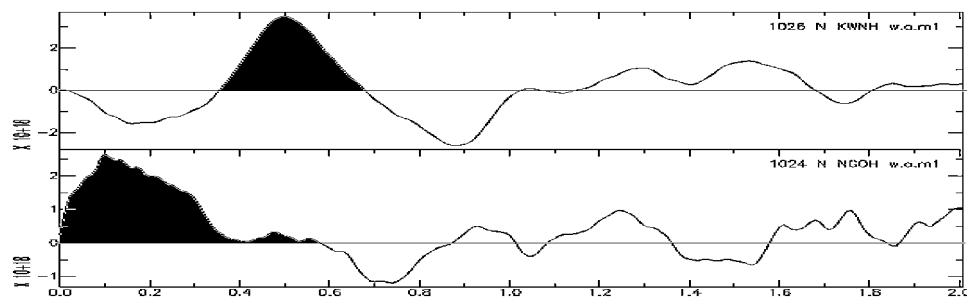


Fig. 11. Source time function of target event 20 and small event 1026 (top), and source time function of target event 20 and small event 1024 (bottom).

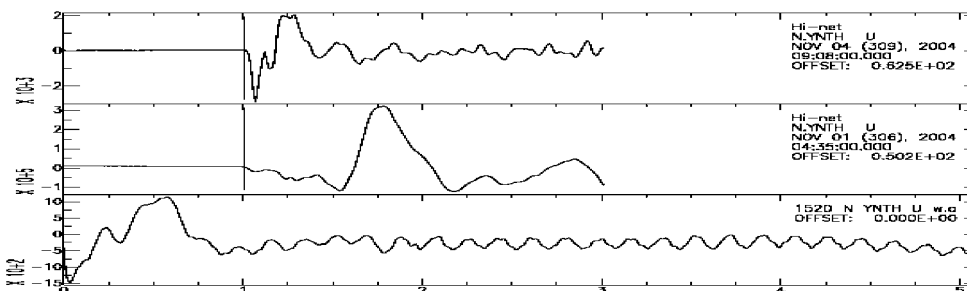


Fig. 12. Displacements of small event 1520 (top), and target event 21 (center) during before 1 sec, and after 2 sec to rise time of P wave, and deconvolution result (bottom).

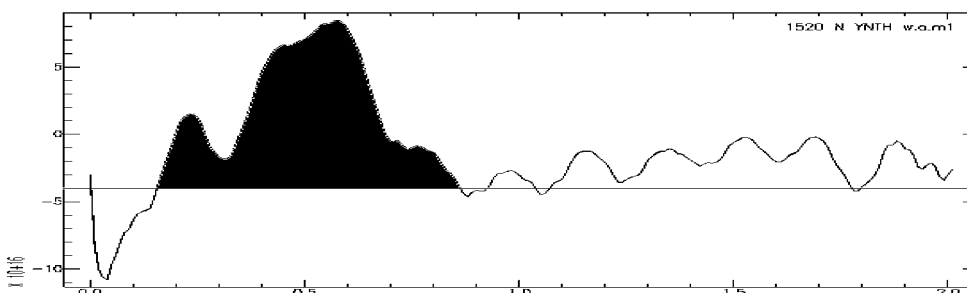


Fig. 13. Source time function of target event 21 and small event 1520.



**Table 2** Calculated stress drops

Target No.	Obs. Point	small event No.	$M_j$	$\Delta\sigma_s$ (MPa)	$\Delta\sigma_d$ (MPa)
20	N-KWNH	1026	1.6	74.14	1.45
	N-NGOH	1024	2.5	49.78	1.51
21	N-YNTH	1520	2.7	0.42	0.31
22	N-NGOH	1620	2	1.13	2.25

る緯度138.617 経度37.150と緯度139.117 経度37.415を結んだ断面のP波速度構造により決定した。

動的応力降下：Mori J., (2003) の方法により下記の式を用いて動的応力降下  $\Delta\sigma_d$  を求めた。

$$\Delta\sigma_d = Mo(4\pi)^{-1}(1-\xi^2)^2 v^{-3}(\bar{u})^{-1} \dot{u}/t \quad (3)$$

ただし、 $(1-\xi^2)^2 : 0.75$ ,  $\dot{u}/t$  : 震源時間関数の初期勾配,  $\bar{u}$  = 震源時間関数の面積。

以上の方法により求めた応力降下を Table 2 に示す。表からターゲットイベント20 ( $M_j 5.8$ ) の微小地震イベント1026に対する静的応力降下が大きすぎることがわかる。これは震源時間関数の計算ピークを2波目に設定したためと思われる。しかし、微小地震イベント1024に対しては、49.7 Mpa となり Mori, J. (2003) のスケーリング則とも調和的である。動的応力降下は1.51 Mpa と小さいが、静的応力降下と同様に調和的で、また動的摩擦則から考えても妥当と考えられる。次にターゲットイベント21 ( $M_j 4.8$ ) の微小地震イベント1520に対する静的応力降下は、0.42 Mpa, 動的応力降下は0.31 Mpa となる。マグニチュードの低さから、応力降下量が急激に低下することがわかる。また、ターゲットイベント22 ( $M_j 5.1$ ) の微小地震イベント1627に対する静的応力降下は、1.13 Mpa, 動的応力降下は2.25 Mpa

となっている。静的な応力降下は1.13 Mpa でよいと考えられる。しかし動的な応力降下は大きく出すぎている。

#### 4. ま と め

2004年新潟中越地震の余震に対して、震源メカニズムと経験的なグリーン関数手法による応力降下量を求めた。得られた震源特性から、震源の深さならびに逆断層型であることを示した。また中越地域の余震による応力降下量の大きさを例で示した。これから、動的応力降下と静的応力降下の比、マグニチュードとの関係を示した。今後さらに応力降下とマグニチュードに対するスケーリング則を求めるためには、震源時間関数の初期勾配と破壊時間についてより適切な基準化が必要である。

#### 謝辞

本論をまとめるにあたり防災科学技術研究所のF-netデータおよびHi-netデータを使用した。また、本論は参考文献(4)の2004年度本学卒業論文によっている。ここに記して感謝いたします。

#### 参 考 文 献

- (1) Mori, J., "Stress drop radiated energies of aftershocks of the 1994 Northridge, California, earthquake", J. geophys. Res., vol. 108 No, B11, PP, 13.1-12, 2003.
- (2) Boatwright, J., "A spectral theory for circular seismic sources, simple estimates of source dimension, dynamic stress drop, and radiated seismic energy", Bull. Seismol. Soc. Am., 70, 1-28, 1980.
- (3) Heaton, T. H., "Evidence for and implications of self-healing pulses of slip in earthquake rupture" Physics of the Earth and Planetary Interiors, No, 64.1-20, 1990.
- (4) 木村保子, 谷山春菜, 平尾正美, "2004年10月23日新潟中越地震の余震の応力降下に関する研究", 国士舘大学工学部卒業論文, 2004, 3.